

О восстановлении скорости ветра и скорости трения ветра на основе данных Sentinel-1 и SFMR в условиях тропических циклонов

О. С. Ермакова, Н. С. Русаков, Е. И. Поплавский, Д. А. Сергеев, Ю. И. Троицкая

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: ermakova@ipfran.ru*

Работа посвящена разработке геофизической модельной функции (ГМФ), позволяющей в отличие от традиционных методов восстанавливать два параметра приводного пограничного атмосферного слоя: скорость ветра на высоте 10 м и скорость трения — на основе РСА-изображений (радары с синтезированной апертурой, *англ.* Synthetic Aperture Radar — SAR), полученных на перекрёстной поляризации с помощью инструмента C-SAR, базирующегося на спутниках Sentinel-1A/B, для режима обзора IW (*англ.* Interferometric Wide swath, интерферометрический широкозахватный). Для конструирования предложенной ГМФ РСА-изображения были совмещены с измерениями микроволнового радиометра SFMR (*англ.* Stepped Frequency Microwave Radiometer). Анализ проводился для спутниковых изображений шести ураганов (категории по шкале ураганов Саффира–Симпсона (*англ.* Saffir-Simpson Hurricane wind Scale — SSHS)): Ирма (*англ.* Irma, категория 5), Мария (*англ.* Maria, категория 5), Гермина (*англ.* Hermine, категория 1), Ларри (*англ.* Larry, категория 3), Дориан (*англ.* Dorian, категория 5), Дельта (*англ.* Delta, категория 4). В основе создания ГМФ лежит предложенный ранее авторами подход, который основан на калибровке излучательной способности поверхности океана, полученной по измерениям SFMR, на данные о параметрах пограничного слоя атмосферы, полученные по информации с GPS-зондов (*англ.* Global Positioning System, система глобального позиционирования). Предложенная ГМФ пригодна для восстановления скорости для умеренных ветров величиной от 15 м/с и вплоть до экстремальных значений порядка 69 м/с для двух первых субполос снимка и до значений 40 м/с для третьей субполосы снимка, скорости трения могут быть восстановлены в диапазоне от 0,8 до 1,7 м/с для всех субполос. Продемонстрировано, что в части восстановления скорости ветра на высоте 10 м результаты расчётов в рамках предложенной ГМФ хорошо согласуются с геофизической модельной функцией MS1A, при этом предельные значения восстанавливаемых скоростей оказываются выше для двух первых субполос.

Ключевые слова: скорость ветра, тропический циклон, перекрёстная поляризация, радиометр, РСА-изображение, скорость трения

Одобрена к печати: 18.11.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-175-185

Введение

Активное микроволновое дистанционное зондирование — один из самых надёжных инструментов для мониторинга поверхности океана, широко используемый, в частности, при разработке алгоритмов восстановления скорости ветра в морском пограничном слое атмосферы, в том числе для экстремальных погодных явлений, таких как тропические циклоны (ТЦ). Наиболее популярными средствами активного дистанционного зондирования, которые часто применяются для измерения скорости и направления ветра, стали скаттерометры (Horstmann et al., 2005; Shen et al., 2006; Weissman, Bourassa, 2011). Однако их разрешающая способность зачастую оказывается недостаточной в районах с большими градиентами скорости ветра, характерными, в частности, для ТЦ. Кроме того, их сигнал значительно ослабляется в районах с высокой интенсивностью дождей (Weissman, Bourassa, 2011). В связи с этим в качестве альтернативы для изучения поля скорости в тропических циклонах используется радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА, *англ.* Synthetic Aperture Radar — SAR) С-диапазона, который обеспечивает высокое разрешение и меньше подвержен влиянию осадков (Vachon, Wolfe, 2011). Для восстановления скорости ветра широко применяются так

называемые геофизические модельные функции (ГМФ), представляющие собой зависимость удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) от скорости ветра, примерами которых для С-диапазона могут служить, в частности, CMOD4, CMOD-IFR, CMOD5, CMOD5.N для сигнала на прямой поляризации (Hersbach, 2003, 2010; Stoffelen, Anderson, 1997). Однако было определено, что для случая прямой поляризации ГМФ демонстрирует эффект насыщения при ураганных значениях скорости ветра (Horstmann et al., 2005). В то же время в работах (Vachon, Wolfe, 2011; Zhang et al., 2011) показано, что для зондирующего сигнала на перекрёстной поляризации значение УЭПР от скорости ветра не насыщается и, таким образом, данный подход может быть использован для восстановления скорости ветра в ТЦ. В исследовании (Zhang, Perry, 2012) авторы предложили модель С-2РО на основе данных Radarsat-2, полученных для кросс-поляризованного сигнала и совмещённых с измерениями с океанографических буёв для диапазона скорости ветра 2–26 м/с. Далее была предложена её модификация С-2РОD (Zhang et al., 2014) для диапазона скорости ветра 3,7–39,7 м/с. Также был разработан ряд геофизических модельных функций, предназначенных для восстановления скорости приводного ветра по данным, полученным со спутника Sentinel-1. Модель MS1A, предложенная в работе (Mouche et al., 2017), была разработана на основе данных, полученных для моды EW (*англ.* Extra Wide swath, режим сверхширокой полосы обзора) Sentinel-1, совмещённых с измерениями со спутника SMAP (*англ.* Soil Moisture Active Passive). Показано, что эта модель лучше всего согласуется с ГМФ H14E, предложенной в исследовании (Hwang et al., 2015). Первые попытки создать ГМФ, предназначенную для восстановления экстремальных скоростей ветра (>40 м/с), для инструмента С-SAR, базирующегося на спутниках Sentinel-1A/B, в режиме обзора IW (*англ.* Interferometric Wide swath, интерферометрический широкозахватный) были предприняты в работе (Gao et al., 2021). Авторы на основе совмещённых измерений с радиометра SFMR (*англ.* Stepped Frequency Microwave Radiometer) и спутников SMAP и Sentinel-1A/B предложили новую ГМФ S1IW.NR, применимую до скорости ветра вплоть до 55 м/с, угловая зависимость при этом была получена для трёх субполос и углов падения от 31 до 46°. Помимо скорости ветра на высоте 10 м U_{10} , одним из важнейших геофизических параметров, влияющих на обмен между атмосферой и океаном, стало касательное турбулентное напряжение (или ассоциированная с ним скорость трения). Оно определяет мелкомасштабную шероховатость поверхности океана, поэтому, предположительно, зависимость УЭПР от турбулентного напряжения должна быть более сильной, чем от U_{10} (Jones, Schroeder, 1978). В работах (Liu, Tang, 2016; Liu, Xie, 2014) были предприняты первые попытки восстановить касательное турбулентное напряжение ветра и связанную с ним скорость трения u_* . Однако в основном предложенные алгоритмы восстановления турбулентного напряжения основываются на его косвенных измерениях, а именно сначала используется зависимость УЭПР от скорости ветра U_{10} (Powell et al., 2003), а далее турбулентное напряжение восстанавливается на основе параметризации (так называемой балк-формулы), связывающей его со скоростью ветра через коэффициент аэродинамического сопротивления C_D . Этот подход имеет очевидные ограничения, так как коэффициент сопротивления является немонотонной функцией скорости ветра при сильном ветре (Donelan et al., 2004; Holthuijsen et al., 2012; Powell et al., 2003); кроме того, предложенные балк-формулы удовлетворительно работают лишь в области низких скоростей ветра. В работе (Poplavsky et al., 2022) был предложен альтернативный подход для восстановления турбулентного напряжения, основанный на использовании совмещённых измерений с GPS-зондов (*англ.* Global Positioning System, система глобального позиционирования) и данных радиометра SFMR. В результате были получены ГМФ, связывающие излучательную способность поверхности океана и скорость ветра U_{10} , скорость трения и коэффициент аэродинамического сопротивления (Poplavsky et al., 2022). Настоящая работа посвящена разработке на основе предложенного выше алгоритма новой ГМФ, которая предназначена для восстановления сразу двух параметров: скорости ветра U_{10} и скорости трения ветра — по РСА-изображениям, полученным с помощью инструмента С-SAR, базирующегося на спутниках Sentinel-1A/B, в режиме обзора IW для широкого диапазона скоростей ветра, включая ураганные (вплоть до 60 м/с и выше). Основной целью при конструировании ГМФ является возможность получения данных о скорости тре-

ния ветра напрямую по данным дистанционного зондирования, в том числе и для высоких скоростей ветра, в отличие от общепринятого подхода, позволяющего восстанавливать лишь скорость ветра U_{10} , в то время как скорость трения определяется на основе полученной U_{10} с помощью балк-формул, которые удовлетворительно работают лишь для области низких скоростей ветра. Также целями в части восстановления скорости ветра U_{10} являются продвижение в область более высоких скоростей и увеличение точности восстановления по сравнению с аналогами MSIA, S1IW.NR. Работа организована следующим образом. В разд. «Описание...» представлено описание массива данных и инструментов для их получения. Раздел «Геофизическая модельная функция...» посвящён обсуждению методов восстановления скорости ветра по радиометрическим данным и по данным PCA-изображений со спутника Sentinel-1, предложена геофизическая модельная функция для сигнала рассеяния, полученного на перекрёстной поляризации для IW-моды спутника Sentinel-1. Проведено сравнение полученной ГМФ с существующими аналогами.

Описание массива данных и инструментов для их получения

Для анализа в настоящей работе использованы PCA-изображения, полученные с помощью инструмента C-SAR, базирующегося на спутниках Sentinel-1A/B Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency — ESA), для C-диапазона (с частотой 5,405 ГГц) на перекрёстной поляризации. Можно выделить четыре основных режима обзора спутника: Stripmap (SM), Interferometric Wide swath (IW), Extra Wide swath (EW), Wave (WV). В настоящем исследовании анализ проводился для режима обзора IW, поскольку он обладает наивысшим разрешением 5×20 м, ширина обзора при этом составляет 250 км, в процессе получения изображения сканирующий луч зондирующего устройства сначала собирает информацию по трём отдельным полосам (так называемым субполосам) (*рис. 1*), при этом создаются три отдельных изображения, которые впоследствии объединяются в одно, выступающее конечным продуктом.

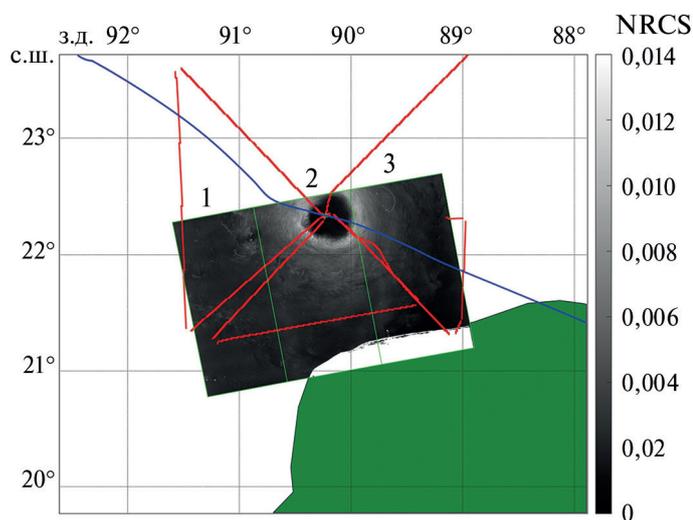


Рис. 1. PCA-изображение урагана Дельта (08.10.2020), полученное со спутника Sentinel-1; красным цветом изображён трек самолёта, синим — трек урагана, зелёными линиями и цифрами на снимке отмечены различные субполосы

Спутниковые снимки размещены в открытом доступе на ресурсе системы Европейских центров морских прогнозов (*англ.* Copernicus Open Access Hub, <https://scihub.copernicus.eu/>). Изображения были получены для шести ураганов (категории по шкале ураганов Саффира – Симпсона (*англ.* Saffir-Simpson Hurricane wind Scale — SSHS)): Дельта (*англ.*

Delta, 08.10.2020 (два снимка), категория 4), Дориан (*англ.* Dorian, 30.08.2019, 31.08.2019, категория 5), Ирма (*англ.* Irma, 07.09.2017 (три снимка), категория 5), Мария (*англ.* Maria, 21.09.2017, 23.09.2017 (два снимка), категория 5), Гермина (*англ.* Hermina, 01.09.2016 (два снимка), категория 1), Ларри (*англ.* Larry, 08.09.2021 (два снимка), категория 3). Для рассмотрения отбирались как снимки, содержащие глаз урагана, так и снимки, зафиксировавшие внешнюю его часть, не содержащую глаз, но демонстрирующие высокий уровень скорости ветра, в результате диапазон анализируемых скоростей ветра составил 15–69 м/с. Все изображения проходили процедуру калибровки и удаления термического шума в приложении SNAP (*англ.* Sentinel Application Platform).

Для каждого спутникового снимка Sentinel-1 были отобраны синхронизированные с ним по времени и пространству измерения с радиометра SFMR NOAA/HRD (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration/Hurricane Research Division — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, отдел исследования ураганов, США). Микроволновый радиометр SFMR измеряет яркостную температуру океана на шести рабочих частотах: 4,55 ГГц; 5,06; 5,64; 6,34; 6,96; 7,22 ГГц. Пространственное разрешение измерений SFMR составляет 1,5 км при типичной скорости самолёта 150 м/с, время сбора данных для всех каналов SFMR — 10 с. Пример изображения с инструмента C-SAR спутника Sentinel-1A для одного из выбранных ураганов с наложенным на него треком урагана и треком самолёта, на борту которого размещался радиометр, приведён на *рис. 1*.

Согласно информации, представленной на сайте NOAA/HRD (<https://www.aoml.noaa.gov/data-products/#hurricanedata>), полученная яркостная температура пересчитывается в излучательную способность по алгоритму, изложенному в работе (Uhlhorn, Black, 2003), а далее с использованием ГМФ, предложенной в публикации (Uhlhorn et al., 2007), проводится пересчёт полученных величин излучательной способности в приповерхностную скорость ветра. При этом в массивах данных SFMR NOAA/HRD величины излучательной способности не содержатся. По этой причине излучательная способность была получена методом обратного пересчёта по ГМФ, предложенной в работе (Uhlhorn et al., 2007). Этот подход был использован при конструировании альтернативной геофизической модельной функции (см. (Poplavsky et al., 2022)), которая позволяет по данным об излучательной способности поверхности океана E_w определять как скорость ветра на высоте 10 м, так и скорость трения u_* (турбулентное напряжение):

$$U_{10} = \begin{cases} 85E_w^{1/3}, & E_w \leq 0,06, \\ 215E_w^{1/2}, & E_w > 0,06, \end{cases} \quad (1)$$

$$u_* = \begin{cases} 4,3E_w^{1/3}, & E_w \leq 0,06, \\ 1,7, & E_w > 0,06. \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, для выбранных снимков на основе выражений (1), (2) сначала проводилась оценка величин скорости ветра и скорости трения ветра по данным об излучательной способности поверхности океана в заданный момент времени в определённой точке пространства, а далее эти величины сравнивались с величинами УЭПР, полученными со спутниковых снимков в той же пространственной точке.

Геофизическая модельная функция для восстановления динамических параметров атмосферного пограничного слоя при сильном ветре на основе изображений со спутника Sentinel-1

На основе сравнения данных SFMR и отобранных PCA-изображений Sentinel-1 был получен массив данных УЭПР для широкого диапазона скорости ветра U_{10} (15–69 м/с), диапазона скорости трения 0,8–1,7 м/с, рассматриваемый диапазон углов падения при этом составил 30,85–45,57°.

Для построения новой ГМФ, которую ниже будем называть S1C.U10FV, был применён подход, предложенный в работе (Hwang et al., 2015), для аппроксимации зависимостей УЭПР от скорости ветра или скорости трения ветра; весь диапазон скоростей ветра был разбит на подобласти, для каждой из которых использовались кусочно-заданные степенные аппроксимации. При этом угловая зависимость УЭПР в каждой такой подобласти достигается за счёт того, что предлагаемые коэффициенты аппроксимации зависят от угла падения. Мы используем степенную зависимость, аналогично тому, как это было предложено в исследовании (Hwang et al., 2015), однако для повышения точности аппроксимации и сшивки данных на границах выбранных областей аппроксимации дополнительно применялся вертикальный сдвиг:

$$\sigma_{VH} = A_i(\theta)X^{a_i(\theta)} + B_i(\theta), \quad X = \{U_{10}, u_*\}.$$

На первом шаге аппроксимируется область с малыми скоростями ветра и одновременно утверждается граница первой области скорости ветра, которая была выбрана для U_{10} , равной 25 м/с. При аппроксимации зависимостей УЭПР от U_{10} для высоких скоростей ветра (более 25 м/с) используется подобласть, доходящая до максимальной скорости ветра, в связи с малым набором данных. Аппроксимации производились внутри каждой из трёх субполос, охватывающих углы падения 30,85–35,9° (субполоса 1, объём выборок данных — 916 точек), 35,9–41,3° (субполоса 2, объём выборок данных — 796 точек), 41,3–45,57° (субполоса 3, объём выборок данных — 834 точки). Полученные значения коэффициентов аппроксимации $A_i(\theta)$, $a_i(\theta)$, $B_i(\theta)$ и $U_{bi}(\theta)$ приведены в таблице.

Весь массив данных для каждой субполосы сопоставлялся с результатами расчётов в рамках геофизических модельных функций MS1A (Mouche et al., 2017) (объём выборки данных — порядка 1400 точек на отдельную субполосу) и S1W.NR (Gao et al., 2021) (объём выборок данных для субполосы 1 — 716 точек, для субполосы 2 — 1075 точек и 992 точек — для субполосы 3). Анализируя рис. 2а–в (см. с. 180), можно сделать вывод, что для первых двух субполос предложенная в настоящей работе ГМФ лучше всего согласуется с MS1A, при том что S1W.NR демонстрирует заметное занижение значений скорости в области скорости ветра 20–50 м/с; для третьей полосы результат, предсказываемый предложенной ГМФ, оказывается завышенным для скорости ветра более 30 м/с, что связано с недостаточной статистикой данных, необходимых для аппроксимации при высоких скоростях ветра. Для каждой из трёх рассмотренных ГМФ был проведён расчёт статистических параметров, таких как RMSE (англ. Root Mean Square Error, величина среднеквадратичного отклонения), bias (отклонение рассчитанной скорости от её измеренного значения) и величина корреляции Corr на базе рассмотренного в настоящей работе массива данных (рис. 3, см. с. 180).

Коэффициенты аппроксимации ГМФ

Зависимость	Угол падения, град	$A_i(\theta)$	$a_i(\theta)$	$B_i(\theta)$	Границы аппроксимации, м/с
$\sigma_{VH}(U_{10})$	30,85–35,9	6,283E-06	2,06	0	15–25
		3,8361E-05	1,55	-9,546e-04	25–63,55
	35,9–41,3	1,233E-06	2,55	0	15–25
		5,5918E-05	1,43	-0,0010	25–69,68
	41,3–45,57	2,66E-07	3,01	0	15–25
		7,6841E-05	1,25	6,09e-05	25–40
$\sigma_{VH}(u_*)$	30,85–35,9	0,00286	1,82	0	0,8–1,2
		0,00287	2,29	-3,811e-04	1,2–1,7
	35,9–41,3	0,00249	2,21	0	0,8–1,2
		0,00284	2,12	-5,063e-04	1,2–1,7
	41,3–45,57	0,00209	3,45	0	0,8–1,2
		0,00287	1,54	1,178e-04	1,2–1,7

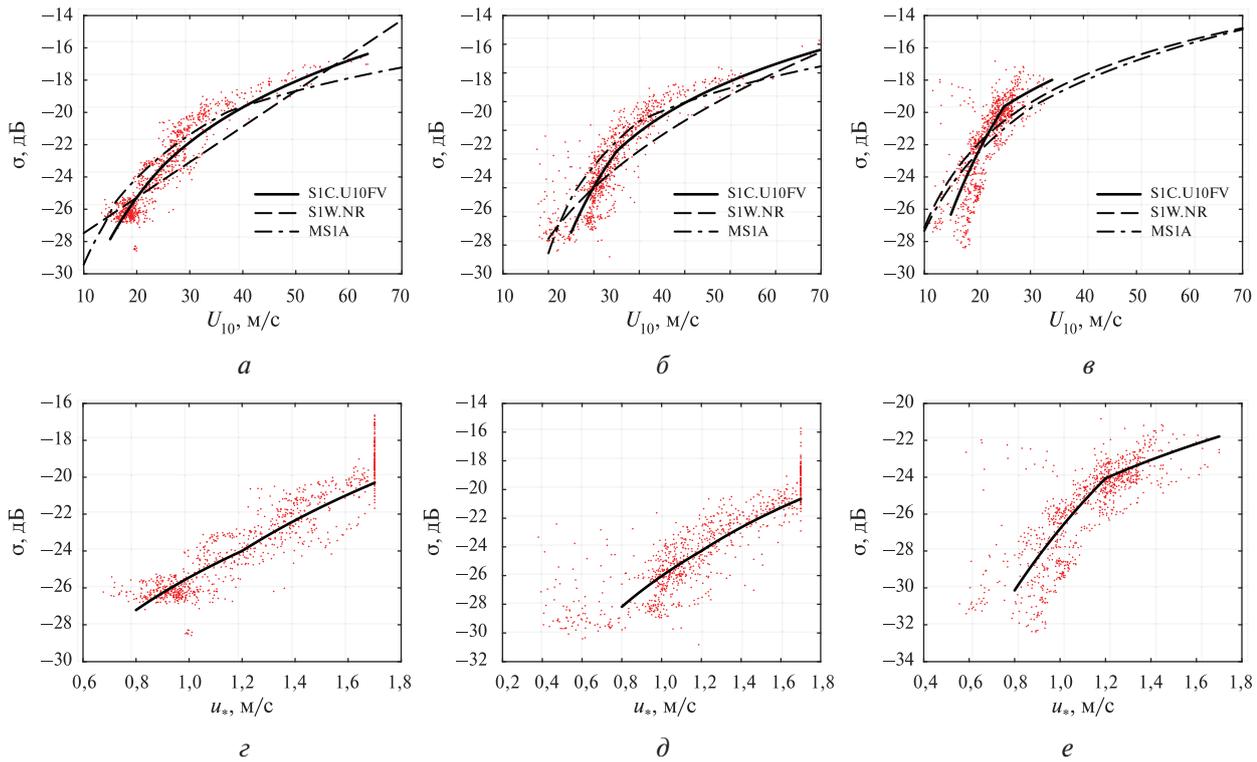


Рис. 2. Зависимости УЭПР от скорости ветра U_{10} : *a* — для 1-й субполосы, *б* — для 2-й субполосы, *в* — для 3-й субполосы; сплошная линия — предложенная ГМФ S1C.U10FV, пунктирная — ГМФ S1W.NR (Gao et al., 2021), штрихпунктирная — ГМФ MS1A (Mouche et al., 2017). Зависимость УЭПР от скорости трения u_* : *г* — для 1-й субполосы, *д* — для 2-й субполосы, *е* — для 3-й субполосы; сплошная линия — предложенная геофизическая модельная функция S1C.U10FV

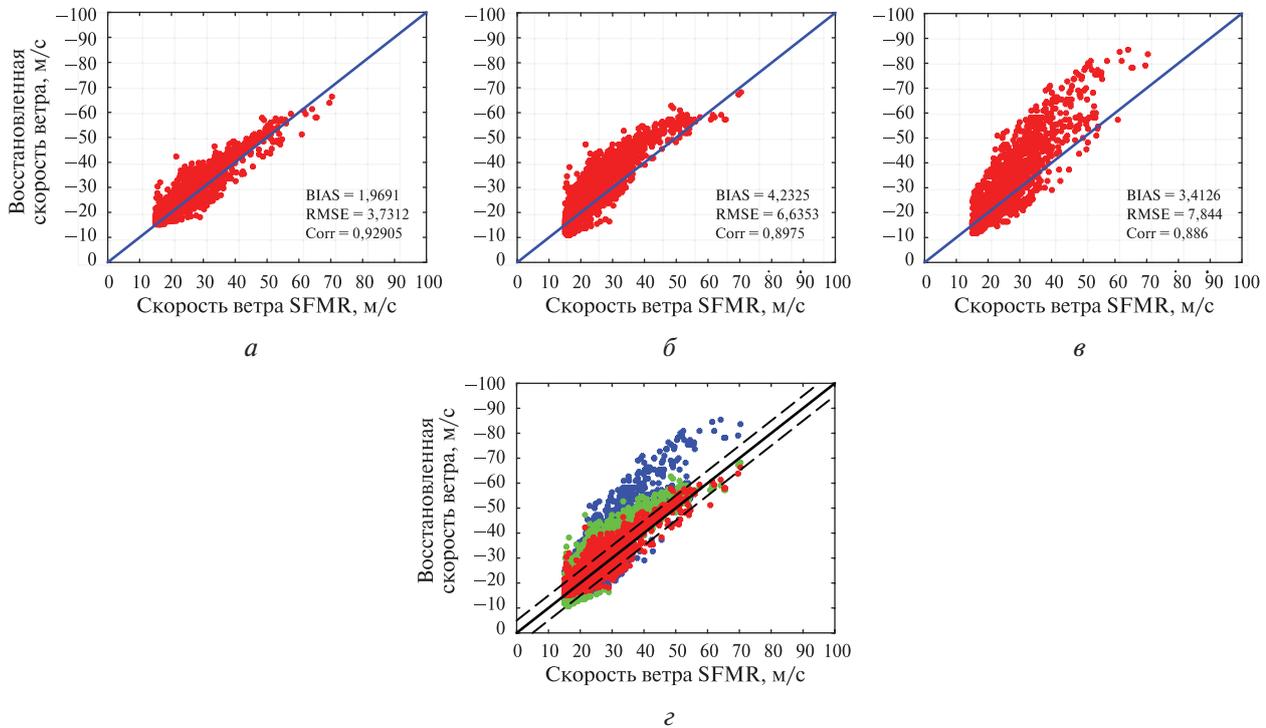


Рис. 3. Зависимость скорости ветра, рассчитанная на основе предложенной ГМФ S1C.U10FV (*a*), ГМФ S1W.NR (Gao et al., 2021) (*б*), ГМФ MS1A (Mouche et al., 2017) (*в*), от скорости ветра, восстановленной по данным SFMR; зависимость скорости ветра, рассчитанной на базе S1C.U10FV (красный цвет), S1W.NR (Gao et al., 2021) (зелёный), ГМФ MS1A (Mouche et al., 2017) (синий), от скорости, измеренной с помощью SFMR (*г*), пунктирными линиями показан интервал скорости 5 м/с

Видно, что величины RMSE, отражающие уровень точности ГМФ, равны 4,225 и 3,4126 для моделей S1W.NR и MS1A соответственно, в то время как для предложенной модели эта величина существенно ниже и имеет значение 1,9691. Для оценки точности восстановления величин скорости ветра на основе предложенной ГМФ были также проведены расчёты процентного соотношения числа точек, для которых отклонение вычисленных с помощью ГМФ значений скорости ветра от измеренной с помощью SFMR скорости ветра не превышает 5 м/с (см. *рис. 3г*). Для расчётов, проведённых в рамках предложенной в настоящей работе функции, это соотношение составляет 84 %, в то же время оно существенно ниже для функций S1W.NR и MS1A: 56 и 68 % соответственно, что свидетельствует о существенно более высокой точности восстановления данных на основе предложенной модели S1C.U10FV. Величины отклонений bias положительные для моделей S1W.NR и MS1A, что связано с переоценкой рассчитанных значений скорости с помощью модели S1W.NR в области перехода от умеренных к высоким значениям скорости ветра, а для модели MS1A заметная переоценка происходит в области экстремально высоких скоростей ветра. На *рис. 2г–е* представлены результаты аппроксимации данных о скорости трения для трёх полос: видно, что для значения скорости трения 1,7 м/с происходит отсечка. Полученный результат связан с ограничениями алгоритма восстановления скорости трения по данным SFMR, обсуждаемыми в работе (Poplavsky et al., 2022).

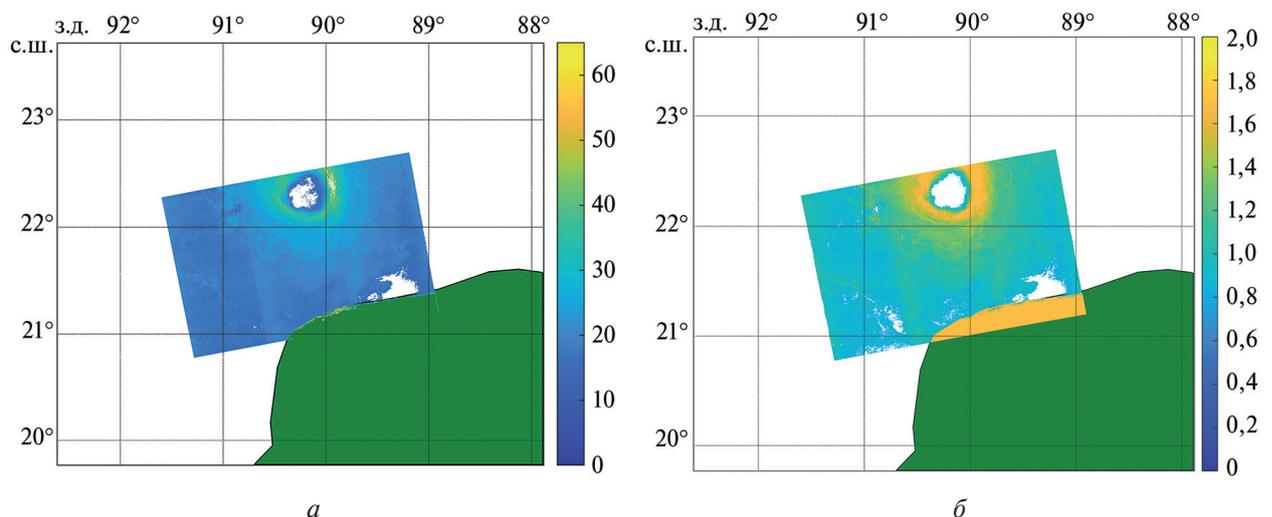


Рис. 4. Двумерное распределение скорости ветра U_{10} (а) и скорости трения u_* (б), рассчитанных на базе предложенной ГМФ S1C.U10FV для снимка Sentinel-1 урагана Дельта (08.10.2020)

На основе предложенной ГМФ были построены двумерные распределения скорости ветра U_{10} и скорости трения u_* для РСА-изображения урагана Дельта (08.10.2020) (*рис. 4*). Анализ показывает, что данные удалось восстановить в стене глаза и в области внешнего вихря урагана. Для зоны внутри глаза возможно применение алгоритма CMOD5, который хорошо себя зарекомендовал в области слабых ветров; отметим, что подобный подход был предложен, в частности, в работе (Mouche et al., 2017). Также необходимо отметить, что предлагаемый метод обеспечивает удовлетворительную «сшивку» значений скорости на границах полос.

Заключение

Общепринятый подход, лежащий в основе конструирования геофизических модельных функций, основан на восстановлении скорости ветра на высоте 10 м по данным дистанционного зондирования, в то время как величину скорости трения или коэффициент аэроди-

намического сопротивления рассчитывают на основе полученной скорости ветра с помощью балк-формул, которые удовлетворительно работают лишь в области низких значений скорости ветра. В настоящей работе была предпринята попытка построить ГМФ, которая позволяет получать значения сразу двух параметров: U_{10} и u_* — непосредственно на основе РСА-изображений с C-SAR-инструмента, базирующегося на спутниках Sentinel-1A/B, полученных для кросс-поляризованного сигнала и режима обзора IW, минуя процедуру использования балк-формул. Предлагаемая ГМФ построена для трёх субполос с интервалом скорости ветра 15–63,55 м/с для 1-й субполосы, 15–69,68 м/с — для 2-й субполосы и 15–40 м/с — для 3-й субполосы и скорости трения в пределах 0,8–1,7 для всех субполос. Предложенная геофизическая модельная функция сравнивалась с существующими ГМФ MS1A, S1IW.NR. Было показано, что разработанная ГМФ лучше всего согласуется с MS1A для первых двух субполос, но при этом позволяет восстанавливать более высокие скорости ветра (выше 60 м/с), в то время как для MS1A предельные значения восстанавливаемых скоростей ветра не превышают 50 м/с (а для большинства интервалов углов падения — 45 м/с), а также были получены более высокие предельные значения скорости ветра для второй субполосы (63,55 м/с), чем в случае S1IW.NR (53 м/с). Что же касается третьей субполосы, то для неё требуется рассмотрение большего массива данных для области высоких скоростей ветра, поэтому в перспективе для улучшения качества ГМФ необходимо снабдить набор данных РСА-изображениями, содержащими глаз урагана именно в пределах третьей субполосы. Проведена относительная оценка точности предложенной ГМФ в сравнении с другими моделями, для этого был проанализирован процент восстановленных величин скорости ветра, отклоняющихся от скорости, измеренной на основе радиометра SFMR не более чем на 5 м/с. Было показано, что для предложенной модели процент рассчитанных значений, близких к измеренным, оказывается наибольшим (85 %) по сравнению с аналогичными моделями S1W.NR и MS1A, для которых он равен 56 и 68 % соответственно. Кроме того, для разработанной модели существенно более низким оказалось и значение среднеквадратичного отклонения, что указывает на более высокий уровень точности восстановления скорости ветра. Предложенная модель позволила достаточно полно восстановить поле скорости на примере изображения урагана Дельта (08.10.2020). При этом восстановленные скорости хорошо совпали на границах субполос, что также подтверждает достоверность приближений, использованных для предложенной ГМФ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-17-00214.

Литература

1. Donelan M.A., Haus B.K., Reul N., Plant W.J., Stiassnie M., Graber H.C., Brown O.B., Saltzman E.S. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. Art. No. L18306. <https://doi.org/10.1029/2004GL019460>.
2. Gao Y., Sun J., Zhang J., Guan C. Extreme Wind Speeds Retrieval Using Sentinel-1 IW Mode SAR Data // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Art. No. 1867. <https://doi.org/10.3390/rs13101867>.
3. Hersbach H. CMOD5, an improved geophysical model function for ERS C-band scatterometry, technical memo / European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. 2003. 52 p.
4. Hersbach H. Comparison of C-Band Scatterometer CMOD5.N Equivalent Neutral Winds with ECMWF // *J. Atmospheric and Ocean Technology*. 2010. V. 27. P. 721–736. DOI: 10.1175/2009JTECHO698.1.
5. Holthuijsen L.H., Powell M.D., Pietrzak J.D. Wind and waves in extreme hurricanes // *J. Geophysical Research*. 2012. V. 117. Iss. 9. Art. No. C09003. <https://doi.org/10.1029/2012JC007983>.
6. Horstmann J., Thompson D.R., Monaldo F., Iris S., Graber H.C. Can synthetic aperture radars be used to estimate hurricane force winds? // *Geophysical Research Letters*. 2005. V. 32. Iss. 22. Art. No. L22801. <https://doi.org/10.1029/2005GL023992>.
7. Hwang P.A., Stoffelen A., van Zadelhoff G.-J., Perrie W., Zhang B., Li H., Shen H. Cross-polarization geophysical model function for C-band radar backscattering from the ocean surface and wind speed retrieval // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2015. V. 120. Iss. 2. P. 893–909. <https://doi.org/10.1002/2014JC010439>.
8. Jones W.L., Schroeder L.C. Radar Backscatter from the Ocean: Dependence on Surface Friction Velocity // *Boundary-Layer Meteorology*. 1978. V. 13. P. 133–149. <https://doi.org/10.1007/BF00913867>.

9. Liu W. T., Tang W. Relating wind and stress under tropical cyclones with scatterometer // J. Atmospheric and Ocean Technology. 2016. V. 33(6). P. 1151–1158. DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0047.1.
10. Liu W. T., Xie X. Sea surface wind/stress vector // Encyclopedia of Remote Sensing. N. Y.: Springer, 2014. P. 759–767. DOI: 10.1007/978-0-387-36699-9.
11. Mouche A., Chapron B., Zhang B., Husson R. Combined Co- and Cross-Polarized SAR Measurements Under Extreme Wind Conditions // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2017. V. 55. Iss. 12. P. 6746–6755. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2732508.
12. Poplavsky E., Rusakov N., Ermakova O., Sergeev D., Troitskaya Y. Towards an Algorithm for Retrieval of the Parameters of the Marine Atmospheric Boundary Layer at High Wind Speeds Using Collocated Aircraft and Satellite Remote Sensing // J. Marine Science and Engineering. 2022. V. 10(8). Art. No. 1136. <https://doi.org/10.3390/jmse10081136>.
13. Powell M. D., Vickery P. J., Reinhold T. A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // Nature. 2003. V. 422(6929). P. 279–283. DOI: 10.1038/nature01481.
14. Shen H., Perrie W., He Y. A new hurricane wind retrieval algorithm for SAR images // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. Iss. 21. Art. No. L21812. <https://doi.org/10.1029/2006GL027087>.
15. Stoffelen A., Anderson D. Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4 // J. Geophysical Research: Ocean. 1997. V. 102. Iss. C3. P. 5767–5780. <https://doi.org/10.1029/96JC02860>.
16. Uhlhorn E. W., Black P. G. Verification of remotely sensed sea surface winds in hurricanes // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. V. 20. P. 99–116. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<0099:VORSSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<0099:VORSSS>2.0.CO;2).
17. Uhlhorn E. W., Black P. G., Franklin J. L., Goodberlet M., Carswell J., Goldstein A. S. Hurricane Surface Measurements from an Operational Stepped Frequency Microwave Radiometer // Monthly Weather Review. 2007. V. 135(9). P. 3070–3085. DOI: 10.1175/MWR3454.1.
18. Vachon P. W., Wolfe J. C-band cross-polarization wind speed retrieval // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2011. V. 8(3). P. 456–459. DOI: 10.1109/LGRS.2010.2085417.
19. Weissman D. E., Bourassa M. A. The influence of rainfall on scatterometer backscatter within tropical cyclone environments — Implications on parameterization of sea-surface stress // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. Iss. 12. P. 4805–4814. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2170842.
20. Zhang B., Perrie W. Cross-polarized synthetic aperture radar: A new potential technique for hurricanes // Bull. American Meteorological Society. 2012. V. 93. Iss. 4. P. 531–541. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00001.1.
21. Zhang B., Perrie W., He Y. Wind speed retrieval from RADARSAT-2 quad-polarization images using a new polarization ratio model // J. Geophysical Research. 2011. V. 116. Iss. C8. Art. No. C08008. <https://doi.org/10.1029/2010JC006522>.
22. Zhang B., Perrie W., Zhang J., Uhlhorn E., He Y. High-Resolution Hurricane Vector Winds from C-Band Dual-Polarization SAR Observations // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2014. V. 31(2). P. 272–286. DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00006.1.

On the retrieval of wind speed and friction wind speed based on Sentinel-1 and SFMR data under tropical cyclone conditions

O. S. Ermakova, N. S. Rusakov, E. I. Poplavsky, D. A. Sergeev, Yu. I. Troitskaya

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: ermakova@ipfran.ru

The work is devoted to the development of an algorithm for wind speed at a height of 10 m and friction speed retrieval in hurricane conditions based on a new geophysical model function (GMF) using image data obtained for cross-polarization from the Sentinel-1 satellite in IW (Interferometric Wide swath) mode. The images were collocated with measurements from the SFMR microwave radiometer. The analysis was performed for satellite images of six hurricanes (categories on the Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale — SSHS): Irma (Category 5), Maria (Category 5), Hermine (Category 1), Larry (Category 3), Dorian (Category 5), Delta (Category 4). The creation of the GMF is based on the approach proposed by the authors earlier, based on the calibration of the ocean surface emissivity,

obtained from SFMR measurements, to the data on the parameters of the atmospheric boundary layer, obtained from the data of GPS-dropsondes. The proposed GMF is suitable for wind speed retrieval for moderate winds with speeds from 15 m/s up to extreme values of about 69 m/s for the first two image sub swaths and up to 40 m/s for the third image sub swath, friction velocities can be retrieved in the range from 0.8 to 1.7 m/s for all sub swaths. It is shown that the results of calculations within the proposed geophysical model function are in good agreement with the existing MSIA GMF, in this case, the limiting values of the retrieved wind speeds obtained with our GMF turn out to be higher for the first two sub swaths.

Keywords: wind speed, tropical cyclone, cross polarization, radiometer, SAR image, friction velocity

Accepted: 18.11.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-175-185

References

1. Donelan M. A., Haus B. K., Reul N., Plant W. J., Stiassnie M., Graber H. C., Brown O. B., Saltzman E. S., On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds, *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, Art. No. L18306, <https://doi.org/10.1029/2004GL019460>.
2. Gao Y., Sun J., Zhang J., Guan C., Extreme Wind Speeds Retrieval Using Sentinel-1 IW Mode SAR Data, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Art. No. 1867, <https://doi.org/10.3390/rs13101867>.
3. Hersbach H., *CMOD5, an improved geophysical model function for ERS C-band scatterometry, technical memo*, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2003, 52 p.
4. Hersbach H., Comparison of C-Band Scatterometer CMOD5.N Equivalent Neutral Winds with ECMWF, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, Vol. 27, pp. 721–736, DOI: 10.1175/2009JTECHO698.1.
5. Holthuijsen L. H., Powell M. D., Pietrzak J. D., Wind and waves in extreme hurricanes, *J. Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, Issue 9, Art. No. C09003, <https://doi.org/10.1029/2012JC007983>.
6. Horstmann J., Thompson D. R., Monaldo F., Iris S., Graber H. C., Can synthetic aperture radars be used to estimate hurricane force winds? *Geophysical Research Letters*, 2005, Vol. 32, Issue 22, Art. No. L22801, <https://doi.org/10.1029/2005GL023992>.
7. Hwang P. A., Stoffelen A., van Zadelhoff G.-J., Perrie W., Zhang B., Li H., Shen H., Cross-polarization geophysical model function for C-band radar backscattering from the ocean surface and wind speed retrieval, *J. Geophysical Research: Ocean*, 2015, Vol. 120, Issue 2, pp. 893–909, <https://doi.org/10.1002/2014JC010439>.
8. Jones W. L., Schroeder L. C., Radar Backscatter from the Ocean: Dependence on Surface Friction Velocity, *Boundary-Layer Meteorology*, 1978, Vol. 13, pp. 133–149, <https://doi.org/10.1007/BF00913867>.
9. Liu W. T., Tang W., Relating wind and stress under tropical cyclones with scatterometer, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, Vol. 33(6), pp. 1151–1158, DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0047.1.
10. Liu W. T., Xie X., Sea surface wind/stress vector, In: *Encyclopedia of Remote Sensing*, New York: Springer, 2014, pp. 759–767, DOI: 10.1007/978-0-387-36699-9.
11. Mouche A., Chapron B., Zhang B., Husson R., Combined Co- and Cross-Polarized SAR Measurements Under Extreme Wind Conditions, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2017, Vol. 55, Issue 12, pp. 6746–6755, DOI: 10.1109/TGRS.2017.2732508.
12. Poplavsky E., Rusakov N., Ermakova O., Sergeev D., Troitskaya Y., Towards an Algorithm for Retrieval of the Parameters of the Marine Atmospheric Boundary Layer at High Wind Speeds Using Collocated Aircraft and Satellite Remote Sensing, *J. Marine Science and Engineering*, 2022, Vol. 10(8), Art. No. 1136, <https://doi.org/10.3390/jmse10081136>.
13. Powell M. D., Vickery P. J., Reinhold T. A., Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, *Nature*, 2003, Vol. 422(6929), pp. 279–283, DOI: 10.1038/nature01481.
14. Shen H., Perrie W., He Y., A new hurricane wind retrieval algorithm for SAR images, *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, Issue 21, Art. No. L21812, <https://doi.org/10.1029/2006GL027087>.
15. Stoffelen A., Anderson D., Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, Vol. 102, Issue C3, pp. 5767–5780, <https://doi.org/10.1029/96JC02860>.
16. Uhlhorn E. W., Black P. G., Verification of remotely sensed sea surface winds in hurricanes, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, Vol. 20, pp. 99–116, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<0099:VO RSSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<0099:VO RSSS>2.0.CO;2).
17. Uhlhorn E. W., Black P. G., Franklin J. L., Goodberlet M., Carswell J., Goldstein A. S., Hurricane Surface Measurements from an Operational Stepped Frequency Microwave Radiometer, *Monthly Weather Review*, 2007, Vol. 135(9), pp. 3070–3085, DOI: 10.1175/MWR3454.1.

18. Vachon P.W., Wolfe J., C-band cross-polarization wind speed retrieval, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, Vol. 8(3), pp. 456–459, DOI: 10.1109/LGRS.2010.2085417.
19. Weissman D. E., Bourassa M. A., The influence of rainfall on scatterometer backscatter within tropical cyclone environments — Implications on parameterization of sea-surface stress, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, Issue 12, pp. 4805–4814, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2170842.
20. Zhang B., Perrie W., Cross-polarized synthetic aperture radar: A new potential technique for hurricanes, *Bull. American Meteorological Society*, 2012, Vol. 93, Issue 4, pp. 531–541, DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00001.1.
21. Zhang B., Perrie W., He Y., Wind speed retrieval from RADARSAT-2 quad-polarization images using a new polarization ratio model, *J. Geophysical Research*, 2011, Vol. 116, Issue C8, Art. No. C08008, <https://doi.org/10.1029/2010JC006522>.
22. Zhang B., Perrie W., Zhang J., Uhlhorn E., He Y., High-Resolution Hurricane Vector Winds from C-Band Dual-Polarization SAR Observations, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, Vol. 31(2), pp. 272–286, DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00006.1.